

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Materijali na bazi tehničke keramike za
izradu kočnih pločica

Ivan Drnas

Zagreb, veljača 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Materijali na bazi tehničke keramike za
izradu kočnih pločica

Voditelj rada:

Prof.dr.sc. Lidija Ćurković

Student: Ivan Drnas

JMBAG: 0035192985

Zagreb, veljača 2017.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Ivan Drnas

Mat. br.: 86889516302

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Materijali na bazi tehničke keramike za izradu kočnih pločica**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Materials based on technical ceramics for the preparation of brake pads**

Opis zadatka:

Jedan od postupaka oblikovanja monolitne i kompozitne tehničke keramike je lijevanje suspenzije i gela. Prvi korak u tom procesu je odabir polaznih sirovina i dodataka.

U ovom je završnom radu potrebno:


- opisati metode oblikovanja tehničke keramike,
- opisati postupak oblikovanja tehničke keramike lijevanjem suspenzije i gela,
- napraviti literaturni pregled materijala koji se koriste za izradu kočnih pločica,
- prikazati svojstva kočnih pločica na bazi monolitne i kompozitne tehničke keramike.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Lidija Čurković

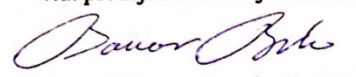
Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

Izjava

Izjavljujem da sam završni rad na temu „Materijali na bazi tehničke keramike za izradu kočnih pločica“ izradio samostalno koristeći znanje stečeno tijekom studija i koristeći navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici Prof.dr.sc. Lidiji Ćurković na savjetima i pomoći prilikom izrade ovog završnog rada.

Također zahvaljujem se dr.sc. Marijani Majić Renjo na ukazanoj pomoći i savjetima.

Ivan Drnas

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. TEHNIČKA KERAMIKA.....	2
2.1. Proizvodnja tehničke keramike.....	3
2.1.1. Metode oblikovanja tehničke keramike.....	5
2.2. Postupak oblikovanja tehničke keramike lijevanjem suspenzije i gela.....	7
3. VRSTE KOČNICA U AUTOMOBILIMA.....	13
3.1. Materijali za izradu kočnih pločica.....	15
3.1.1. Vlakna za ojačavanje.....	15
3.1.2. Veziva.....	18
3.1.3. Punila.....	20
3.1.4. Aditivi.....	20
4. SVOJSTVA KOČNIH PLOČICA NA BAZI MONOLITNE I KOMPOZITNE TEHNIČKE KERAMIKE.....	22
4.1. Proces dobivanja i svojstva keramičkih materijala na bazi aluminijevog oksida s dodatkom silicijevog karbida.....	22
4.2. Svojstva kompozitnog Al-SiC materijala.....	27
4.3. Svojstva kompozitnih materijala s ugljičnim vlaknima i dodatkom silicijevog karbida.....	29
5. ZAKLJUČAK.....	31
6. POPIS LITERATURE.....	32

Sažetak

U radu je ukratko opisana tehnička keramika i njena primjena danas. Opisani su koraci u proizvodnji tehničke keramike, a posebno je razrađena faza oblikovanja te su navedene i ukratko opisane razne metode oblikovanja tehničke keramike s posebnim naglaskom na postupak oblikovanja tehničke keramike lijevanjem suspenzije i gela. Dalje u radu navedene su i objašnjene dvije vrste kočnica koje se koriste u cestovnim vozilima. Napravljen je literaturni pregled materijala koji se koriste za izradu kočnih pločica u disk kočnicama. Navedene su prednosti i nedostaci pojedine vrste konstituenata, te su obrađeni radovi koji se bave istraživanjima svojstava kočnih pločica na bazi monolitne i kompozitne tehničke keramike.

Popis oznaka i mjernih jedinica

HV	tvrdća po Vickersu,
p	tlak, [Mpa],
m	masa, [g],
θ	temperatura, [°C],
λ	toplinska vodljivost, [W/mK],
d	relativna gustoća, [%],
F	opterećenje, [N],
K_{IC}	lomna žilavost, [Pa \sqrt{m}],
ρ	gustoća [g/cm ³],
MRR	stopa trošenja, [mm ³ /MJ],
v	brzina okretanja, [m/s],
	brzina trošenja, [g/mm ²].

Popis slika

Slika 1. Primjer proizvoda od aluminijskog oksida [5].....	2
Slika 2. Primjer proizvoda od silicijskog karbida [5].....	2
Slika 3. Primjer keramičkog kompozita s metalnom matricom [5].....	2
Slika 4. Koraci pri proizvodnji tehničke keramike [7].....	4
Slika 5. Suho prešanje [4].....	5
Slika 6. Izostatičko prešanje s područjima različitog zgušnjavanja [4].....	6
Slika 7. Kalup za lijevanje suspenzije [9].....	7
Slika 8. Koraci pri lijevanju suspenzije u kalup [9].....	8
Slika 9. Otvaranje kalupa i vađenje proizvoda [9].....	9
Slika 10. Primjer proizvoda dobivenog lijevanjem suspenzije [11].....	10
Slika 11. Izgled linije automatiziranog postupka lijevanja suspenzije [11].....	10
Slika 12. Dijelovi bubanj (čeljusne) kočnice [13]	13
Slika 13. Dijelovi disk kočnice [14].....	14
Slika 14. Udjel pojedine od četiri osnovne skupine materijala u kočnim pločicama [15]	15
Slika 15. Kočne pločice s azbestnim vlaknima [16].....	16
Slika 16. Kočne pločice na bazi tehničke keramike [17].....	17
Slika 17. Odnos između relativne gustoće i masenog udjela SiC u $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ kompozitima [18]..	24
Slika 18. Promjene tvrdoće prema Vickersu i lomne žilavosti u odnosu na udjel silicijskog karbida u $\text{SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ kompozitima [18]	25
Slika 19. SEM morfologija prijelomnih površina ((a) AS0, (b) AS1, (c) AS5 i (d) AS20) [18].....	27
Slika 20. Odnos toplinske vodljivosti i masenog udjela ugljičnih vlakana[20].....	29
Slika 21. Odnos toplinske vodljivosti i gustoće materijala[20].....	30

Popis tablica

Tablica 1. Prednosti i nedostaci uobičajenih postupaka oblikovanja [4]	12
Tablica 2. Prednosti i nedostaci vrste vlakana koje se koriste za izradu kočnih pločica [15]	18
Tablica 3. Vrste veziva pri izradi kočnih pločica i njihove prednosti i nedostaci [15].....	19
Tablica 4. Vrste punila i njihova osnovna svojstva [15]	20
Tablica 5. Vrste aditiva i njihova osnovna svojstva [15]	25
Tablica 6. Rezultati mjerenja savojne čvrstoće [18]	26
Tablica 7. Rezultati ispitivanja trošenja Al- SiC materijala[19].....	28

1.UVOD

Keramički materijali od davnina su prisutni u našoj svakodnevnici, od nama najbliže sanitarne keramike i dijelova kuhinjskog posuđa preko sveprisutnijih implanata u stomatologiji i medicini do raznih dijelova tehničkih sklopova, elektroničkih elemenata i drugih funkcionalnih dijelova. Primjenjuju se u slučajevima za koje se do nedavno smatralo nezamislivima, od keramičkih dijelova motora, komunikacijskih optičkih kablova, elektrooptičkih dijelova lasera, podloga u električnim krugovima do elektroda u fotokemijskim uređajima. Predmeti izrađeni od materijala na bazi keramike zadržavaju prvotna svojstva pri dugotrajnoj uporabi u ekstremnim uvjetima što ih svrstava među najkvalitetnije, često, ali gledajući s dugoročne isplativosti ne nužno i skuplje materijale u usporedbi s dijelovima za istu namjenu od nekog drugog materijala.

Zbog činjenice da se interes za keramiku znatno povećao tek nakon što su se već jako dobro istražili metalni i polimerni materijali, paradoksalnim izgleda da je baš keramika jedna od najstarijih, ali istovremeno i najnovijih krutina u uporabi.

U Hrvatskoj postoji više proizvođača tehničke keramike i keramičkih dijelova. Neke od njih su *Applied Ceramics* iz Siska, *Selk* iz Kutine, *Inker* iz Zaprešića, no korisnici u industriji vrlo često nedovoljno poznaju svojstva i mogućnosti primjene ovih materijala.

Materijali na bazi tehničke keramike pokazuju jako dobra i postojana svojstva pri visokim radnim temperaturama. Zbog toga zadnjih petnaestak godina sve se više ulaže u ispitivanja i razvoj keramičkih kočnih pločica koja u kliznom paru s kočnim diskom, koji također može biti izrađen od kompozitne tehničke keramike, zaustavljaju vozilo uz znatno tiši rad i manje trošenje od dosada najviše korištenih metalnih kočnih pločica [1].

Zadatak rada je napraviti literaturni pregled tehničke keramike koja nas okružuje u svakodnevnom životu, predstaviti i objasniti metode oblikovanja te proučiti i prikazati svojstva kočnih pločica na bazi monolitne i kompozitne tehničke keramike.

2. TEHNIČKA KERAMIKA

Tehnička keramika, još se naziva i konstrukcijska, inženjerska ili industrijska keramika, je podskupina proizvoda od keramičkih materijala koji imaju neku tehničku namjenu. Keramika je čvrsti materijal građen od beskrajne trodimenzijske mreže sinteriranih kristalnih zrna građenih od atoma metala vezanih s ugljikom, dušikom ili kisikom [2]. Keramikom se definiraju svi krhki, temperaturno i korozijski postojani materijali napravljeni pečenjem gline ili drugih materijala sadržavajući jedne ili više vrsta metala u kombinaciji s jednom ili više nemetala, u pravilu uključujući kisik [3].

Tehnička keramika prema mineralnom sastavu dijeli se na:

- silikatnu keramiku (npr. porculan, mulit, kordijerit, steatit)
- oksidnu keramiku (tipični predstavnici: Al_2O_3 , ZrO_2 , Al_2TiO_5)
- neoksidnu keramiku (tipični predstavnici: SiC , Si_3N_4 , B_4C , kubni BN, tvrdi metali: TiN, TiC, AlN) [4].



Slika 1. Primjer proizvoda od aluminijeva oksida [5]



Slika 2. Primjer proizvoda od silicijevog karbida [5]



Slika 3. Primjer keramičkog kompozita s metalnom matricom [5]

2.1. Proizvodnja tehničke keramike

Definiranjem postupka proizvodnje i vrstom sirovine utječe se na temeljna svojstva keramičkih materijala. U cjelokupnom procesu proizvodnje, određeni prah, oblikovanje i proces sinteriranja zajedno utječu na stvaranje presudno važne mikrostrukture, a time i željenih svojstava proizvoda.

Potrebni koraci pri dobivanju dijelova od tehničke keramike su: [4, 6].

- PROCESI PRIPREME SIROVINE :
 - određivanje sastava,
 - mljevenje,
 - miješanje i priprema samljevenog praha,
 - granuliranje,
 - spajanje pomoću veziva,
 - sušenje raspršivanjem.

Postoje dvije mogućnosti pripreme mase s obzirom u kakvom obliku početna sirovina dolazi do proizvođača. Masa može biti prethodno pripremljena i proizvođač je dobiva kao takvu i nastavlja s oblikovanjem ili proizvođač dobiva sirovine i sam poduzima daljnje korake pripreme.

- OBLIKOVANJE
Izbor pogodnog postupka oblikovanja ovisi o udjelu vode i s tim povezanom oblikovljivošću sirovine, ali s druge strane i o konačnoj geometriji dijela, veličini i broju komada. Prema DIN 8580 razlikujemo postupke praoblikovanja i preoblikovanja keramičkih izradaka koji su razvrstani u dvije skupine: -prešanje i lijevanje

S obzirom koji postupak oblikovanja koristimo, prethodno moraju biti pripremljene specifične mase i to:

- suspenzije za lijevanje
- granulati za prešanje
- i tzv. keramička tijesta (oblikovljive mase) za ekstrudiranje [4].

Skupine oblikovanja prethodno razvrstane na prešanje i lijevanje, dalje dijelimo na:

- rotacijsko oblikovanje, za simetrične okrugle dijelove;
 - isprešavanje profila, cijevi i šipki (sirovina s oko 20 % vode);
 - suho prešanje (< 8 % vode). Tlak iznosi > 30 MPa, postupak se može automatizirati i to za veći broj komada;
 - mokro prešanje (8 ... 12 % vode) za složenije oblike, tlak iznosi od 1 do 20 Mpa;
 - izostatičko prešanje. Uz tlak od 400 MPa sirovina postiže 85 % gustoće;
 - injekcijsko prešanje;
 - lijevanje u formu – (engl. Slip Casting ili njem. Schlickergiessen) za pojedinačne voluminozne šuplje oblike.
- SINTERIRANJE predstavlja najvažniju operaciju u proizvodnji keramičkih izradaka. Razlikujemo sljedeće postupke:
 - sinteriranje u različitim atmosferama,
 - reakcijsko sinteriranje (RB),
 - sinteriranje uz vruće prešanje (HP),
 - sinteriranje uz vruće izostatičko prešanje (HIP).

Cilj keramičkih tehnologija je dobivanje mehanički čvrstih tvorevina koje odgovaraju različitim zahtjevima. U procesu sinteriranja (pečenja), slabe veze sirovog izratka očvršćuju pri visokim temperaturama. U procesu pečenja dolazi i do zgušnjavanja proizvoda, što se očituje smanjenjem poroznosti. I ovaj proces dovodi do smanjenja volumena, što se još naziva i skupljanjem zbog pečenja.

- ZAVRŠNA OBRADA :

- brušenje dijamantnim alatima, lepanje, honanje, poliranje, elektroerozija, lasersko rezanje i obrada.



Slika 4. Koraci pri proizvodnji tehničke keramike [7]

2.1.1. Metode oblikovanja tehničke keramike

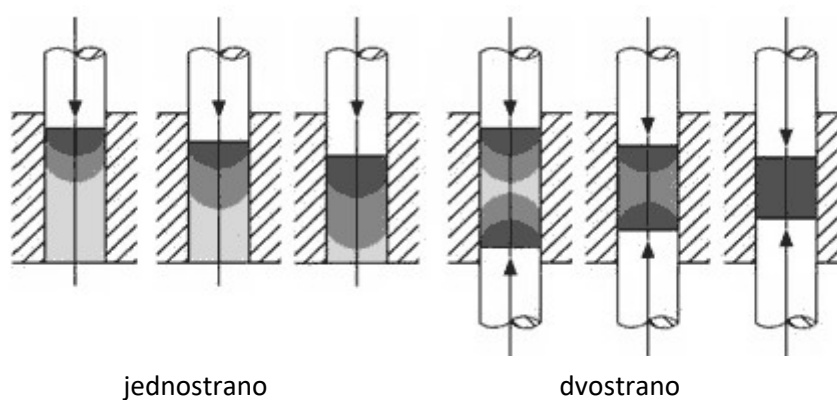
U ovom koraku dobivanja keramičkog proizvoda prahovi se zgušnjavaju čime se dobivaju definirani željeni oblici koji su kao takvi pogodniji za daljnje rukovanje. Izratci u ovom stadiju su još uvijek sirovi i nazivaju se sirovci ili zeleni izratci (engl. green body). Kao takvi pogodni su za preoblikovanje ili prerađivanje prije pečenja. Prilikom oblikovanja vrlo je važno da se postigne jednolika gustoća obratka kako se pečenjem ne bi unijela zaostala naprezanja u materijal i kako ne bi došlo do deformacija.

Postupci oblikovanja keramike mogu se podijeliti u sljedeće temeljne skupine:

- prešanje (vlažnost 0-15%)
- plastično oblikovanje (vlažnost 15-25%)
- lijevanje (vlažnost >25%) [4] .

Suho prešanje

Najviše se rabi za izradu masovnih artikala točnih mjera. Prilikom ovog postupka dobro sipljiv materijal zgušnjuje se u čeličnom kalupu čiji oblik odgovara željenom obliku konačnog proizvoda. Ovaj postupak s ekonomičnog aspekta isplativ je tek pri velikoserijskoj proizvodnji jednostavnijih i kompliciranijih proizvoda. S obzirom na prirodu otvaranja i zatvaranja kalupa, ukoliko željeni izradak treba imati provrte ili udubljenja moguće ih je napraviti već u ovom stadiju, ali samo ona koja su u smjeru otvaranja i zatvaranja kalupa. Finiji sitni oblici na izratku izvedivi su samo ukoliko to granulacija sirovine dozvoljava [4].



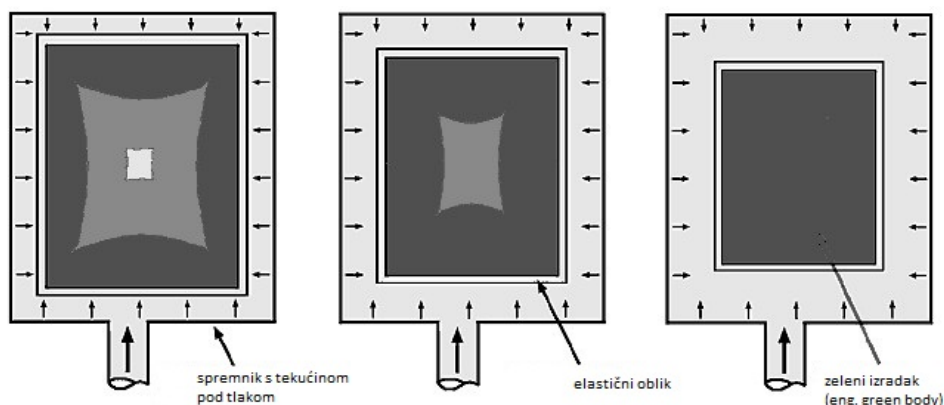
Slika 5. Suho prešanje [4]

Mokro/vlažno prešanje

Mase koje se koriste u ovom postupku imaju vlažnost 5-15 %. Ovim postupkom izrađuju se kompliciraniji oblici koji sadrže navoje, utore, upuste itd. Tako pripremljene mase postaju tekuće pod utjecajem jednoosnih tlačnih opterećenja, čime se postiže ravnomjerno zgušnjavanje. Loša je činjenica to da mase za mokro prešanje mogu podnijeti ograničena tlačna naprezanja čime je ograničen i stupanj zgušnjavanja koji jako ovisi o udjelu vlage u masi i manji je nego u slučaju suhog prešanja [4].

Izostatičko prešanje

Ovim načinom proizvode se komplicirani dijelovi u maloserijskoj proizvodnji. Većinom služi za proizvodnju ravnomjerno isprešanih sirovaca pogodnih za daljnju preradu u sirovom stanju [4].



Slika 6. Izostatičko prešanje s područjima različitog zgušnjavanja [4]

Ovo oblikovanje prikladno je za izradu zahtjevnih prototipova i za izradu proizvoda u maloserijskoj proizvodnji. Ovaj postupak može se automatizirati u određenim sličajevima.

Injekcijsko lijevanje (prešanje)

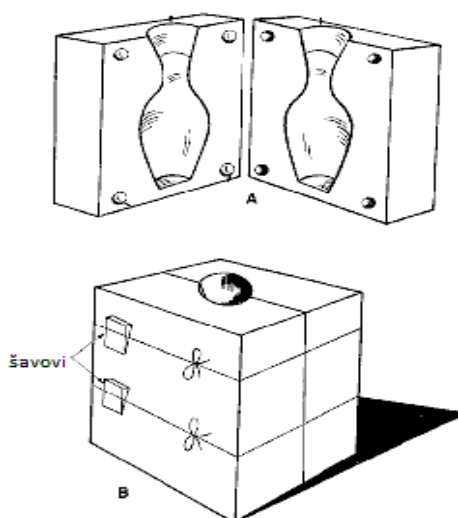
Ovaj način oblikovanja tehničke keramike koristi se za izradu složenijih dijelova. Primjenu ovog postupka ograničavaju veliki troškovi alata i skupa veziva (uklanjanje organskih aditiva). Masa punjenja kod velikih strojeva za injekcijsko lijevanje iznosi obično do približno 70 g. Treba predvidjeti što je moguće jednoličnije debljine stijenki koje su ograničene do 12 mm [4].

2.2. Postupak oblikovanja tehničke keramike lijevanjem suspenzije i gela

Masa za oblikovanje može se pripremiti kao suspenzija za lijevanje, granulat za prešanje ili keramičko tijesto za ekstrudiranje. Lijevanje suspenzije (engl. slip casting) jednostavna je, pouzdana, fleksibilna, ekonomski povoljnija i ekološki prihvatljivija tehnologija za proizvodnju monolitne i kompozitne keramike različite veličine i složenosti oblika proizvoda. Unatoč dolje navedenim prednostima, postupak lijevanja može biti kompliciran ukoliko nisu postignute odgovarajuće karakteristike suspenzije za lijevanje, kao što su: viskoznost, gustoća i sastav, odnosno ako pripravljena suspenzija nije stabilna [8].

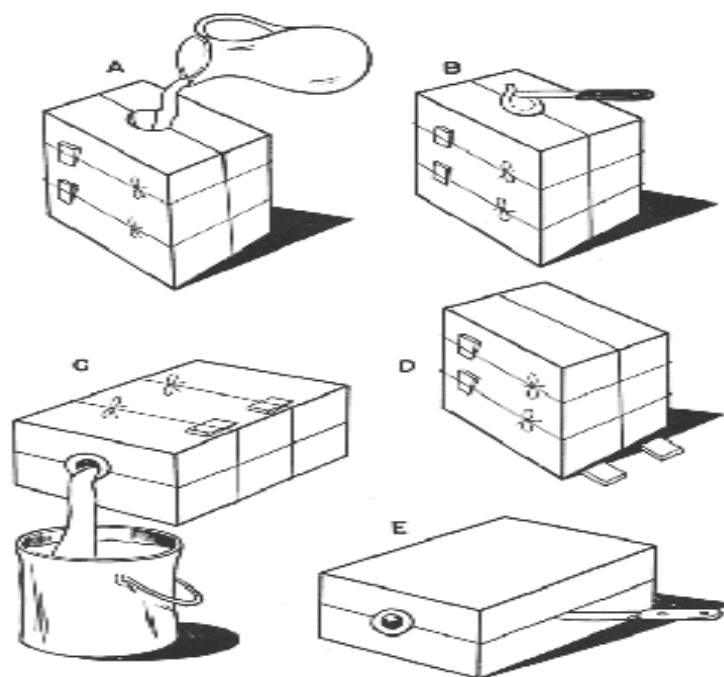
Lijevanje suspenzije jednostavna je metoda za proizvodnju prototipova i dizajnerski kompliciranih dijelova, kao i izradaka velikih dimenzija. Kako je prikazano slikom 7 stabilna suspenzija (njem. Schlicker) pripremljena mješanjem vode i keramičkog praha ulijeva se u porozne upijajuće gipsane oblike. Izdvajanjem suspenzijske tekućine stvara se na stijenkama sloj čestica koje u slučaju punog odljevka rastu do konačnog oblika izratka proizvoda. U slučaju šupljeg lijeva suvišna masa suspenzije se izlijeva nakon postizanja odgovarajuće debljine stijenke [4].

Zatvaranjem kalupa i osiguravanjem istoga kao što je prikazano na slici 7 možemo započeti s ulijevanjem suspenzije.



Slika 7. Kalup za lijevanje suspenzije [9]

Suspenzija se ulijeva u gipsani, najčešće dvodijelni, kalup, obično jednom stranom naslonjen na podlogu kako bi se izbjeglo zarobljavanje mjehurića. Odmah nakon doticanja s kalupom, tanki rubni film se stvara. Ovaj tanki sloj igra ključnu ulogu u daljnjem procesu lijevanja. Propusnost i kapilarnost gipsa obično ne utječu na sam proces lijevanja dok god su zadovoljavajući. Budući da je inicijalni nastali tanki keramički film manje propusan za fino zrnatu smjesu od gipsa on diktira daljnje korake i ograničenja. Količina vode u gipsanom kalupu mora biti strogo kontrolirana. Ukoliko je gips presuh smjesa se prebrzo stvrdnjava, što za posljedicu ima nepravilne oblike. Ukoliko je gips prezasićen vodom, smjesa je pretvrda i proces zgušnjavanja se zaustavlja zbog slabe propusnosti. Gips se može testirati postavljanjem plastične cijevi napunjene vodom na vrh kalupa i mjerenjem količine vode koju je apsorbirao. Ukoliko je kalup bio presuh potrebno ga je namočiti vodom, ukoliko je prevlažan potrebno ga je staviti u peć na temperaturu od 60°C. Gipsani kalup najbolje je oblikovati na staklenoj podlozi koja može osigurati kvalitetu i preciznost pri rukovanju [6].



Slika 8. Koraci pri lijevanju suspenzije u kalup [9]

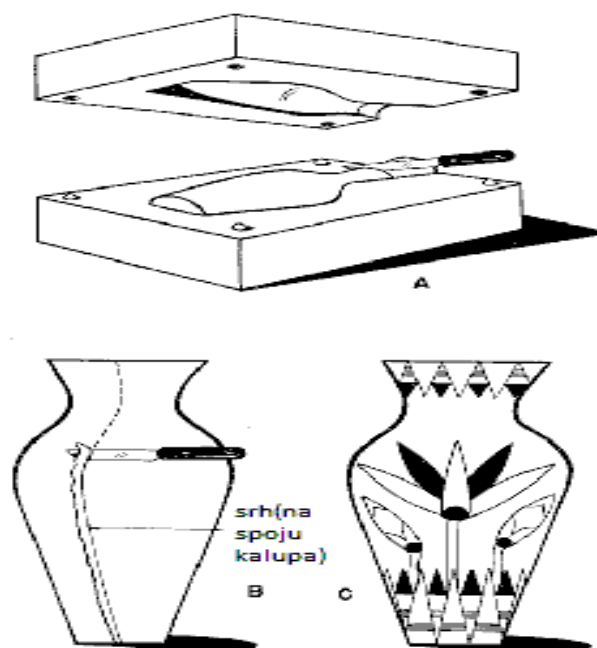
Popunjavanje kalupa izvodi se direktnim ulijevanjem smjese. Na vrh kalupa često se postavlja prsten koji služi kao spremnik. Kod uobičajenog lijevanja suspenzije postoje dvije metode: ulijevanje pa izlivanje viška (engl. drain casting) i lijevanje punog volumena (engl. solid casting). Kod prve metode suspenzija se ulijeva u kalup, formira se stijenka do željene debljine i višak se izliva iz kalupa. Ova metoda nije precizna, ali u većini slučajeva je zadovoljavajuća. Drugom metodom lijevanja, lijevanjem punog volumena, dobivaju se puni oblici, tj. kalup se

popunjava, a cijeli sadržaj se skrućuje. Također mogu se predvidjeti provrti ukoliko se u fazi ulijevanja u kalup dodaju neki pomoćni dijelovi kao što su cijevi i sl. Prilikom ulijevanja kalup se može protresati tako što je pričvršćen na električni vibrirajući stol, što rezultira boljim popunjavanjem kalupne šupljine i omogućava izlazak mjehurića van.

Sušenje

Sušenje izratka u većini slučajeva provodi se na zraku imajući na umu da je vodena para veće gustoće od zraka. Kalup se povremeno zakreće kako bi se osiguralo jednoliko sušenje. Sušenje se također može provoditi u peći na temperaturama između 40 i 60 °C [10]. Izratke je uvijek potrebno držati na propusnim ili šupljikavim podlogama.

Vađenje proizvoda izvodi se postupnim otvaranjem kalupa i izvlačenem pomoćnih dijelova ukoliko su bili prisutni. Nakon izvlačenja izradak ide na daljnju obradu prilikom koje se uklanja srh nastao na mjestu spajanja kalupa i kao takav ide dalje na brušenje, poliranje, bušenje, i sl.



Slika 9. Otvaranje kalupa i vađenje proizvoda [9]



Slika 10. Primjer proizvoda dobivenog lijevanjem suspenzije [11]

Postupak lijevanja suspenzije može se automatizirati u slučajevima velikoserijske proizvodnje.



Slika 11. Izgled linije automatiziranog postupka lijevanja suspenzije [11]

Lijevanjem suspenzije i gela dodaje se polimer koji služi kao katalizator koji ubrzava cijeli proces skrućivanja. Dodavanjem polimernog katalizatora viskoznost fino zrnate smjese rapidno se povećava. Komplicirani dijelovi proizvode se ovim procesom. Prilikom rada treba pripaziti na probleme sušenja i pojave pukotina. Te pojave usko su povezane sa finozrnatim mješavinama, ali i to je rješivo. Mogući način kako da se ovo riješi je dodavanje malo grubljih zrna ($4\text{-}5\text{ }\mu\text{m}$). Ukoliko je materijal grubozrnat u kombinaciji sa finozrnatim česticama, propusnost i volumen krutine su znatno veći i sušenje je manje problematično. Cementna faza koja se koristi pri lijevanju je kalcijev aluminat. Svojim prisustvom znatno smanjuje skupljanje pri sušenju. Kalcijev aluminat vlaži i podmazuje, a nakon pečenja kristalizira. Vatrostalni je materijal i služi kao vezivo. Aditivi se mogu dodati kako bi se skratilo ili produljilo vrijeme. Jedan od mogućih aditiva

koji se koriste pri lijevanju suspenzije i gela ima komercijalno ime *Superloid*. Pospješuje rukovanje pomiješan s kalcijevim kloridom, loša strana ovog aditiva jest što dijelovi ne mogu imati veliku tvrdoću [10].

Postupak oblikovanja odabire se najčešće prema ekonomskim kriterijima kao i prema tome je li pogodan za izradu željenog proizvoda. U tablici 1 navedene su prednosti i nedostaci pojedinih postupaka oblikovanja.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci uobičajenih postupaka oblikovanja [4]

Postupci oblikovanja	Prednosti	Nedostaci
Lijevanje suspenzije	<ul style="list-style-type: none"> kompleksni dijelovi (tankostijeni, nesimetrični) mali trošak materijala 	<ul style="list-style-type: none"> komplikirana reologija hrapave površine problematično stvaranje oblika ograničena tolerancija oblika široka tolerancija mjera
Tlačno lijevanje (u usporedbi sa suspenzijskim lijevanjem)	<ul style="list-style-type: none"> brzo stvaranje komada mali gubici uslijed sušenja dobra dimenzijska stabilnost nema povratnog sušenja ne zahtijeva mnogo mjesta 	<ul style="list-style-type: none"> skupi alati potrebne velike serije problematične organske otopine
Lijevanje folija	<ul style="list-style-type: none"> kontinuirana proizvodnja tanki slojevi dobra dimenzijska stabilnost velik proizvodni kapacitet 	<ul style="list-style-type: none"> ograničena geometrija dijelova veliki investicijski troškovi nužno je sušenje
Injekcijsko lijevanje	<ul style="list-style-type: none"> kompleksne geometrije male tolerancije dobra ponovljivost vrlo dobra kvaliteta površine oštre konture velik broj komada 	<ul style="list-style-type: none"> veliki troškovi alata veliko trošenje alata ograničena veličina izradaka skupo uklanjanje veziva neuobičajeni gradijenti gustoće
Ekstrudiranje	<ul style="list-style-type: none"> kontinuirana proizvodnja velik proizvodni kapacitet dijelovi velikih duljina jeftina proizvodnja 	<ul style="list-style-type: none"> izražene teksture nužno sušenje
Suho prešanje	<ul style="list-style-type: none"> automatizirani proces dobra ponovljivost dobra dimenzijska stabilnost ograničeno sušenje jeftina izrada velikog broja komada 	<ul style="list-style-type: none"> ograničena geometrija dijelova moгуći gradijenti gustoće skupi alati za oblikovanje skupa priprema praha
Mokro/vlažno prešanje (u usporedbi sa suhim prešanjem)	<ul style="list-style-type: none"> dijelovi kompliciranih geometrija ravnomjerna raspodjela gustoće 	<ul style="list-style-type: none"> nužno sušenje slabo zgušnjavanje veće tolerancije
Izostatičko prešanje	<ul style="list-style-type: none"> velike gustoće bez teksture nema gradijenta gustoće 	<ul style="list-style-type: none"> kratki radni ciklusi

3. VRSTE KOČNICA U AUTOMOBILIMA

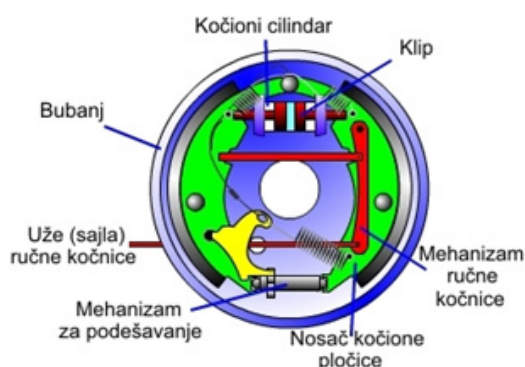
U ovom dijelu rada napravljen je literaturni pregled vrsta kočnica u automobilima, kao i vrsta materijala koji se koriste za izradu kočnih pločica, često nazivanih i pakne, kočnog sustava.

Motorna vozila moraju imati odgovarajuće uređaje za zaustavljanje, kočni sustav, kojim vozač može sigurno, brzo i djelotvorno usporiti ili zaustaviti vozilo.

Cestovna vozila imaju isključivo tarne kočnice koje energiju gibanja vozila pretvaraju u toplinu. S obzirom na konstruktivnu izvedbu, kočnice kotača mogu biti:

- bubanj kočnice (čeljusne kočnice, kočnice s bubnjem), i
- disk kočnice (kočnice s pločom) [12].

Bubanj kočnice (čeljusne) prvenstveno se primjenjuju u osobnih vozila na stražnjoj osovini (danas se sve više disk kočnice stavljaju i na stražnje kotače modernijih automobila) i na svim kotačima kod teretnih osovina. Bubanj je čvrsto spojen s glavinom kotača, te se okreće zajedno s njom i kotačem. Čeljusti s kočnim oblogama i uređaj za podešavanje čeljusti nalaze se na nosaču kočnice, čvrsto pričvršćenom na ovjes kotača. Prilikom kočenja čeljusti se sa svojim oblogama potiskuju na bubanj i razvijaju potrebnu silu trenja.



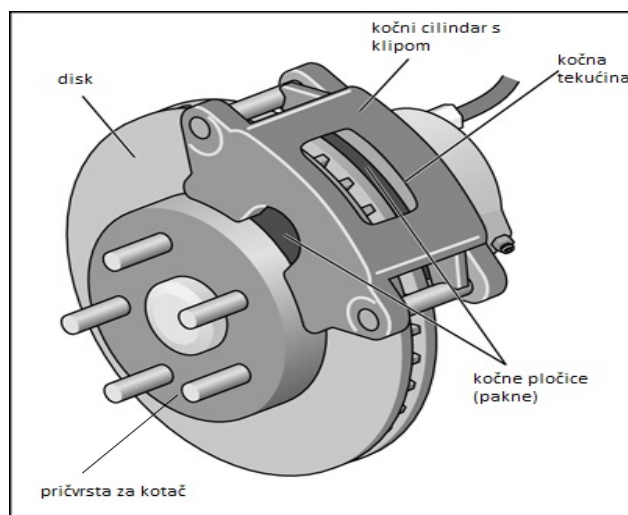
Slika 12. Dijelovi bubanj (čeljusne) kočnice [13]

Bubanj kočnice postupno se zamjenjuju disk kočnicama jer se slabo hlade i dolazi do tzv. *fadinga* ili gubljenja snage nakon jačih uzastopnih kočenja.

Kočnice u kojima nalazimo kočne pločice nazivaju se disk kočnice. Rad disk kočnica može se usporediti s radom kočnica na biciklu, gdje gibljiva kliješta obuhvaćaju kotač, a pri kočenju gumenim oblogama taru o naplatak. Kod vozila kočnice ne djeluju izravno na kotač, već na metalnu ploču, tzv. disk, koja se okreće zajedno s kotačem.

Osnovni dijelovi disk kočnice su:

- kočna ploča ili disk
- kočni cilindar s klipom
- kočne pločice
- nosač kočnice [12].



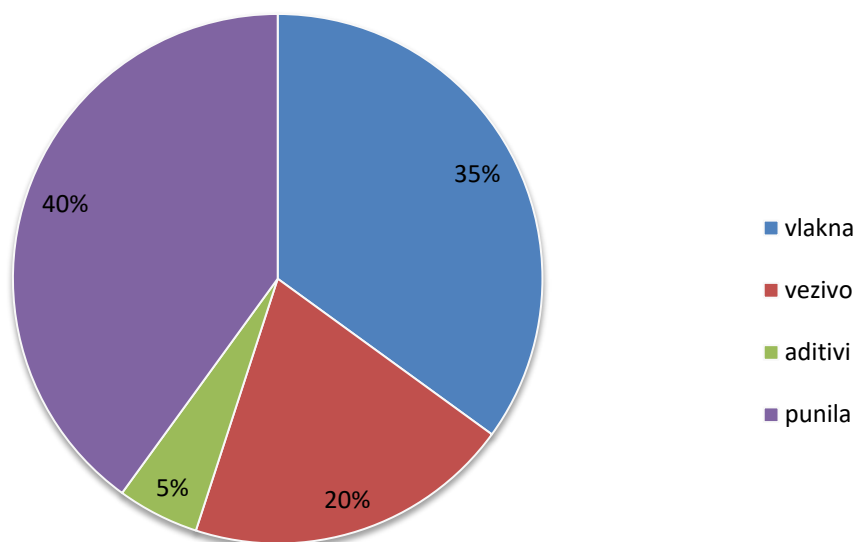
Slika 13. Dijelovi disk kočnice [14]

Zadatak kočnih pločica je, nakon što vozač pritisne papučicu kočnice i sila kočenja preko hidrauličkog sustava dođe do kočnog cilindra s klipom koji onda gura kočne pločice, direktnim kontaktom s diskom koji se rotira zajedno s kotačima, osigurati usporavanje ili zaustavljanje vozila.

3.1. Materijali za izradu kočnih pločica [15]

U ovom dijelu rada napravljen je literaturni pregled materijala koji su se koristili i koji se danas koriste za izradu kočnih pločica. Četiri su osnovne komponente od kojih je napravljena jedna kočna pločica: vlakna za ojačavanje, vezivo, punilo i aditivi za sigurniji rad u kliznom paru.

Približan udjel pojedine komponente u materijalu prikazan je slikom 14.



Slika 14. Približan udjel pojedine od četiri osnovne skupine materijala u kočnim pločicama [15]

3.1.1. Vlakna za ojačavanje

Vlakna za ojačavanje su najvažnija te ujedno i najzastupljenija komponenta kočnih pločica. Njihova uloga je osiguranje čvrstoće materijala. Prema istraživanjima tarno opterećenje pri kočenju koncentrirano je na tanki površinski izbočeni sloj koji se izdiže iznad tlačno opterećene zone. Ove izbočine tvore se od vlakana i mekše faze koja ih okružuje.

Kočne pločice s azbestnim vlaknima

Najstarije kočne pločice sadržavale su azbestna vlakna. Još 1908. godine engleski pronalazač Herbert Frood koristio je kombinaciju azbestnih vlakana, žice od mjedi i smole za izradu obloga koje su bile opterećene trenjem. Azbest je vrlo jeftin i stvara površinu otpornu na trošenje. Visokom temperaturom taljenja $800-850\text{ }^{\circ}\text{C}$ i odličnom toplinskom vodljivošću od $0,15\text{ W/mK}$, vrlo je postojan pri uporabi na visokim temperaturama. 1980-ih godina dokazano je štetno kancerogeno djelovanje azbesta na ljudsko zdravlje i otada se njegova uporaba izbjegava.



Slika 15. Kočne pločice s azbestnim vlaknima [16]

Kočne pločice sa staklenim vlaknima

Staklena vlakna u širokoj uporebi su od 1970-ih godina. Povezana propisanom smolom imaju vrlo veliku čvrstoću i prikladna su za uporabu pri visokim temperaturama. Obično staklo ima temperaturu taljenja $1430\text{ }^{\circ}\text{C}$ što je znatno više od temperature taljenja azbesta. Kako bilo, toplinska vodljivost staklenih vlakana je tek $0,04\text{ W/mK}$ što je znatno lošije od azbestnih ili bakrenih vlakana.

Kočne pločice s metalnim vlaknima

Granule metalnih materijala vrlo često koriste se kao vlakna za očvršćivanje. Iako oblikom ne moraju nužno odgovarati vlaknima obavljaju njihovu funkciju. Korištena metalna vlakana su od čelika, mjedi ili bakra. Nedostatak čeličnih vlakana je nedovoljna kemijska postojanost, korodiraju i na površini ostaje hrđa koja pogoršava elastična svojstva materijala. Zbog toga određene kočne pločice sadrže metale, kao što je cink, raspršene unutar materijala kako bi obavljale funkciju anode u slučaju pojave korozije. Još jedna loša strana čeličnih vlakana je što ukoliko su prisutna u prevelikom udjelu mogu izazvati pretjerano trošenje pločica. Najveća prednost metalnih vlakana je njihova toplinska vodljivost i brzo odvođenje topline s kontaktne površine. Neke kočne pločice sadrže oksidirana ili fosfatirana vlakna, kako bi im se poboljšala lomna žilavost i čvrstoća.

Kočne pločice na bazi keramičkih materijala

Uporaba keramičkih vlakana je relativno nov način proizvodnje kočnih pločica u usporedbi s korištenjem metalnih vlakana. Obično se koriste različiti metalni oksidi, kao što je aluminijev oksid, i karbidi i to uglavnom silicijev karbid. Zbog visoke temperaturne otpornosti (temperature taljenja kreću se od 1850 °C do 3000 °C), male mase i visoke tvrdoće, prikladni su kao vlakna za očvršćivanje. Zbog visoke tvrdoće, a male mase ovi su materijali puno prikladniji od metalnih vlakana, koja su znatno veće mase. Ne samo da se koriste za izradu kočnih pločica, nego se koriste i u izradi diskova za kočnice.



Slika 16. Kočne pločice na bazi tehničke keramike [17]

U tablici 2 navedene su osnovne prednosti i nedostaci pojedine vrste vlakana koja se koriste za izradu kočnih pločica.

Tablica 2. Prednosti i nedostaci vrste vlakana koje se koriste za izradu kočnih pločica [15]

Materijal	Prednosti	Nedostaci
Azbest	<ul style="list-style-type: none"> • dobra postojanost svojstava pri visokim temperaturama • jeftin 	<ul style="list-style-type: none"> • štetan za ljudsko zdravlje
Staklo	<ul style="list-style-type: none"> • dobra postojanost pri visokim temperaturama (visoka točka tališta, približno 1430 °C, ali omekšava pri približno 600 °C) 	<ul style="list-style-type: none"> • krhak
Metal	<ul style="list-style-type: none"> • temperaturno otporni čelici i bakar imaju temperature tališta iznad 1000 °C 	<ul style="list-style-type: none"> • preveliki udjeli mogu uzrokovati pretjerano trošenje • korodira
Keramika	<ul style="list-style-type: none"> • temperaturno postojan (imaju visoke temperature tališta od približno 1700-3000 °C) • dobar odnos masa-tvrdoća 	<ul style="list-style-type: none"> • vrlo krhki
Ugljična vlakna	<ul style="list-style-type: none"> • niska gustoća, mala masa • niski koeficijent termičke ekspanzije • dobra kemijska otpornost 	<ul style="list-style-type: none"> • visoki troškovi proizvodnje • oksidira na zraku pri temperaturama iznad 450 °C

3.1.2. Veziva

Zadatak veziva u kočnim pločicama je osiguranje integriteta i homogenosti sastava materijala, odnosno držanje komponenata na okupu. Izbor veziva vrlo je bitan korak pri proizvodnji kočnih pločica jer o njemu ovisi i postojanost svojstava ostalih komponenti kao što su vlakna za očvršćivanje i drugi. U tablici 3 navedene su vrste veziva koje se koriste, kao i njihove prednosti i mane. Glavni uvjet koji veziva moraju zadovoljiti je otpornost na visoke temperature. Idealnim vezivima smatraju se epoksidne i modificirane silikatne smole.

Tablica 3. Vrste veziva pri izradi kočnih pločica i njihove prednosti i nedostaci [15]

Vrsta veziva	Prednosti	Nedostaci
Fenolne smole	<ul style="list-style-type: none"> • jeftine i vrlo lako se proizvode 	<ul style="list-style-type: none"> • krhke, slaba udarna žilavost • toksične na relativno niskim temperaturama, već pri 450 °C
COPNA (condensed poly nuclear aromatic) smole	<ul style="list-style-type: none"> • visoka vezivna čvrstoća s grafitom koji je često mazivo • visoka otpornost na trošenje 	<ul style="list-style-type: none"> • razgrađuje se pri relativno niskim temperaturama (između 450 i 500 °C)
Modificirana silikatna smola	<ul style="list-style-type: none"> • bolja žilavost od fenolne smole • dobra otpornost na visoke temperature i kemijska postojanost • otvrdnjavaju apsorpcijom vode 	<ul style="list-style-type: none"> • na bazi je fenolne smole i zbog toga je toksična
Cijanidna smola	<ul style="list-style-type: none"> • visokotemperaturna postojanost • kemijska postojanost • prigušuje vibracije 	<ul style="list-style-type: none"> • krhke
Modificirane epoksidne smole	<ul style="list-style-type: none"> • bolja temperaturna postojanost od čiste fenolne smole 	<ul style="list-style-type: none"> • na bazi je fenolne smole i zbog toga je toksična
Termoplastične poliamidne smole	<ul style="list-style-type: none"> • otporne na abraziju • ne oslabljuju povišenjem temperature 	<ul style="list-style-type: none"> • toplinska vodljivost tri puta lošija od fenolne smole

3.1.3. Punila

Punila se dodaju u kočne pločice kako bi se poboljšala njihova proizvodnost, a time i smanjili sami troškovi konačnog proizvoda. Njihova uloga, iako ne ključna kao što je uloga vlakana za očvršćivanje, nije nebitna. Vrsta punjenja bira se prema vrsti ostalih komponenti koje su prisutne u proizvodu. U tablici 4 navedene su neke vrste punila i njihova osnovna svojstva.

Tablica 4. Vrste punila i njihova osnovna svojstva [15]

Vrsta punila	Osnovna svojstva
Barijev sulfat	<ul style="list-style-type: none"> doprinosi toplinskoj stabilnosti poboljšava karakteristike trenja
Kalcijev karbonat	<ul style="list-style-type: none"> doprinosi toplinskoj stabilnosti
Tinji (engl. Mica)	<ul style="list-style-type: none"> prigušuje buku uzrokuje međuslojno razdvajanje u materijalu
Vermikulit	<ul style="list-style-type: none"> prigušuje buku ima lošu visokotemperaturnu otpornost
Alkalni titanati	<ul style="list-style-type: none"> stabiliziraju koeficijent trošenja
Molibden (III) oksid	<ul style="list-style-type: none"> sprječava visokotemperaturno trošenje i lom pri visokom temperaturama
Gumena prašina	<ul style="list-style-type: none"> prigušuje buku ne prijanja dobro uz vlakna za ojačanje

3.1.4. Aditivi

Razni materijali se dodaju za bolji rad kočnih pločica u kliznom paru s ciljem povećanja koeficijent trenja te smanjenja trošenja.

Podjeljeni su u dvije glavne skupine:

- lubrikanti, smanjuju koeficijent trenja i smanjuju trošenje,
- abrazivi, povišuju koeficijent trenja i povećavaju trošenje

Ukoliko su prisutni u velikim količinama, aditivi mogu obavljati i zadaću punila.

S obzirom u koliko su mjeri prisutni, utječu na karakteristike trenja i trošenja:

- a) kočne pločice sa većim sadržajem lubrikanata pokazuju veću stabilnost koeficijenta trenja
- b) kočne pločice sa većim sadržajem abraziva pokazuju veća odstupanja koeficijenta trenja.

Zbog tih pojava potrebno je postići kompromis između sadržaja lubrikanata i abraziva u samom materijalu. U tablici 5 navedeni su neki predstavnici dodataka i njihova osnovna svojstva.

Tablica 5. Vrste aditiva i njihova osnovna svojstva [15]

Vrsta aditiva	Osnovna svojstva
Grafit	<ul style="list-style-type: none"> • široko korišten lubrikant • dostupan u prirodnom i sintetičkom obliku • ima samopodmazujuća svojstva
Metalni sulfidi	<ul style="list-style-type: none"> • dobra podmazujuća svojstva • imaju lošiju provodljivost od grafita • neki predstavnici: antimon, bakar, olovo(II)sulfid
Metalni oksidi/silikati	<ul style="list-style-type: none"> • abrazivi s visokim rasponom tvrdoće od 500HV, (npr. kvarc) do 1750HV (npr. aluminijev oksid) • neki predstavnici: silicijev dioksid, cirkonijev silikat, cirkonijev oksid, aluminijev oksid

4. SVOJSTVA KOČNIH PLOČICA NA BAZI MONOLITNE I KOMPOZITNE TEHNIČKE KERAMIKE

4.1. Proces dobivanja i svojstva keramičkih materijala na bazi aluminijevog oksida s dodacima silicijevog karbida [18]

Strukturna keramika koja uključuje Al_2O_3 posjeduje vrhunska svojstva kao što su visokotemperaturna otpornost, dobra kemijska postojanost i srednja do visoka mehanička čvrstoća. Lomna žilavost je niska zbog toga što su gibanja dislokacija vrlo ograničena ionskim i/ili kovalentnim vezama. Krhkost i niska otpornost na udarce ograničavaju njihovu primjenu kao naprednih inženjerskih materijala. Posljednja dva desetljeća mnogo napora se ulagalo u unapređenje čvrstoće i žilavosti keramičkih materijala. Nekoliko korisnih načina je razvijeno: premošćivanje površina prijeloma, raspršivanje čestica različitih faza u matrici, vlaknima ojačani kompoziti itd. Dodavanjem jednog ili više sastojaka u osnovni materijal da se stvori nanokompozit s keramičkom matricom, kratica CMNC (engl. Ceramic matrix nano-composite), dokazano se poboljšavaju lomna žilavost i tvrdoća [18].

Uobičajeno je da se takve strukture oblikuju s materijalima čija je veličina čestica u nano- ili nano-/mikrometrima.

Iako neka prethodna istraživanja naglašavaju da veličina čestica u mikrometrima još uvijek ima prednost pri očvršćavanju keramičkih kompozita, u ovom slučaju dokazano je da je nano-strukturama također moguće dobiti dobra svojstva.

Ranije navedene kočne pločice na bazi keramičkih materijala pokazuju jako dobra svojstva. Obično se koriste različiti metalni oksidi, kao što je aluminijev oksid, i karbidi kao što je silicijev karbid.

U zadnje vrijeme, utjecaj veličine zrna na svojstva $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ kompozita detaljno je istražen. S ciljem promicanja uporabe ovih naprednih materijala, opsežnim proučavanjem bi trebalo obraditi sastav materijala, način dobivanja, mehanizme otvrdnjavanja i očvršćavanja, i proizašla svojstva. U predstavljenom radu Y. L. Donga iz 2008. godine, *Fabrication and mechanical properties of nano-/micro-sized $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ composites*, iz časopisa *Materials science and engineering*, slaganje intragranularnih nanostrukture istraženo je s keramičkim kompozitom na

bazi Al_2O_3 ojačanim česticama SiC-a širokog raspona veličina. Morfologija i mehanizam slaganja intragranularnih nanostruktura istraženo je s aspekta njihovih mehaničkih svojstava. U slijedećim točkama izneseni su koraci pri dobivanju i ispitivanju te rezultati mjerenja svojstava iz navedenog rada.

Dobivanje materijala

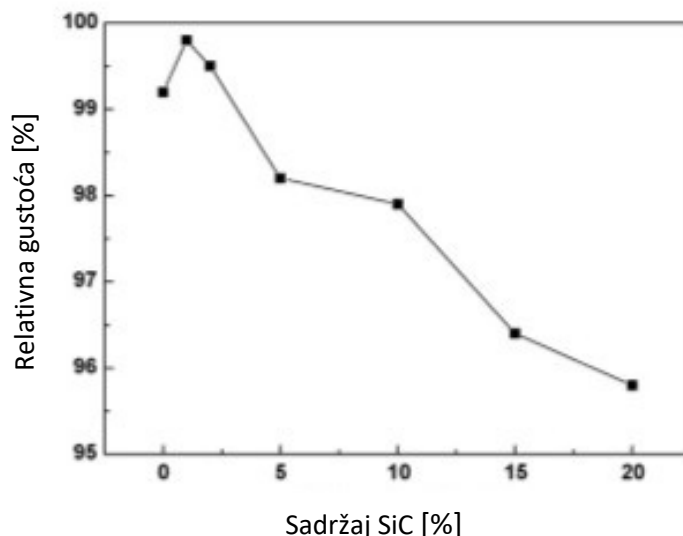
Početno korišteni materijali u radu Y. L. Donga iz 2008. godine pod naslovom *Fabrication and mechanical properties of nano-/micro-sized $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ composites* bili su visoke čistoće $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($\geq 99.99\%$) i prahovi SiC. Prosječna veličina Al_2O_3 je $1\ \mu\text{m}$. Prahovi silicijevog karbida korišteni u ovom istraživanju imaju prosječnu veličinu čestica od $1\ \mu\text{m}$, no veličina čestica rasipa se od $100\ \text{nm}$ do $1,9\ \mu\text{m}$. Da bi se raspršile nakupine čestica, mješavina prahova prvotno se podvrgla homogenizaciji u etanolu u trajanju od 30 minuta. Homogenizirani prahovi osušeni su u sušioniku i prosijani kroz sito na veličinu čestica $0,25\ \text{mm}$. Tako pripremljeni Al_2O_3 prahovi sadržavaju masene udjele silicijevog karbida u iznosima 1% , 2% , 5% , 10% , 15% , 20% (zbog toga označeni kao AS1, AS2, AS5, AS10, AS15, AS20 u odnosu na maseni udjel). Mljeveni su u kugličnom mlinu (engl. ball-mill) s Al_2O_3 medijem za usitnjavanje u deioniziranoj vodi 4 sata. Homogena suspenzija zatim je osušena i otplinjena u peći. Takav mješavina praha je zatim stavljena u plastičnu vrećicu i dodatno raspoređena valjanjem valjkom (engl. rolling pin). Mješavina je prosijana kroz sito na veličinu čestica $0,25\ \text{mm}$ (engl. 60-mesh screen sieve). Tako pripremljeni prah zatim je utisnut u grafitni kalup i brižno je raspoređen kako bi se osigurala podjednaka rasprostranjenost po kalupu. Vruće prešanje provelo se pri $1635\ ^\circ\text{C}$ i tlaku od $25\ \text{MPa}$ u vakuumu u trajanju od jednog sata da se proizvede pločica promjera $30\ \text{mm}$ te $5\ \text{mm}$ debljine. Prah borovog nitrida izabran kao visokotemperaturno mazivo. Za usporedbu svojstava, pripremljen je i uzorak monolitne Al_2O_3 keramike na isti način (oznaka uzorka: AS0).

Gustoća

Gustoća keramičkih materijala mjerena je Arhimedovom metodom, koristeći deioniziranu vodu kao medij za uranjanje.

Relativna gustoća izračunata je na temelju teorijske gustoće svake faze i prema pravilu mješanja gustoće keramičkih kompozita. Prosječna gustoća dobivena je na temelju 6-10 mjerenja za svaki uzorak.

Odnos između relativne gustoće i masenog udjela SiC u $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ kompozitima prikazan je u dijagramu (slika 17).



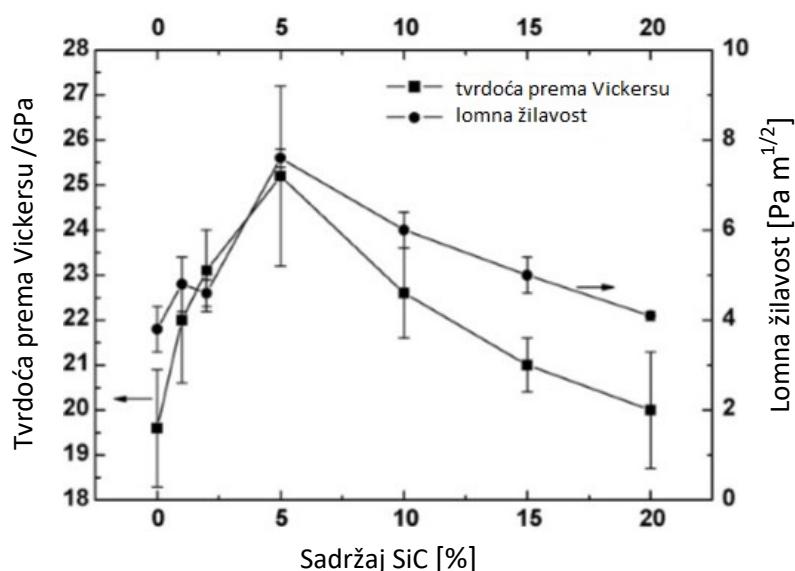
Slika 17. Odnos između relativne gustoće i masenog udjela SiC u $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ kompozitima [18]

Uočava se da AS0, AS1 i AS2 zadržavaju potpunu gustoću. AS1 ima najveću gustoću i to 99,8 % teorijske. Gustoća AS2 nešto je niža od gustoće monolitnog Al_2O_3 , ali i niža od AS1. Za uzorke od AS5 do AS10, povećanjem udjela SiC relativna gustoća opada niža je od gustoće monolitnog Al_2O_3 . Takva pojava uglavnom se pripisuje ugradnji čestica silicijevog karbida koje blokiraju pomicanje granica zrna i koče zgušnjavanje aluminijskog oksida.

Mehanička svojstva

Uzorci korišteni za ispitivanje tvrdoće i lomne žilavosti polirani su dijamantnim prahom granulacije $1,5\ \mu\text{m}$. Tvrdoća prema Vickersu mjerena je na poliranoj površini opterećenjem od 98 N u trajanju od 15 sekundi koristeći tvrdomjer. Deset točaka je napravljeno u razmacima od 2,5 mm po promjeru za svaki uzorak.

Promjene tvrdoće prema Vickersu i lomne žilavosti u odnosu na udjel silicijevog karbida u $\text{SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ kompozitima prikazane su dijagramom (slika 18) .



Slika 18. Promjene tvrdoće prema Vickersu i lomne žilavosti u odnosu na udjel silicijevog karbida u $\text{SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ kompozitima [18]

Vidljivo je da tvrdoća prema Vickersu raste povećanjem udjela silicijevog karbida i to do iznosa od 5 % masenog udjela. Daljnje povećanje masenog udjela (do 20 %) rezultira smanjenjem tvrdoće. Rezultati prikazani slikom 18. također ukazuju na velika rasipanja rezultata za svaki uzorak, što može biti uzrokovano prisustvom zaostalih naprezanja koja nastaju različitim koeficijentom širenja silicijevog karbida i aluminijevog oksida. Tvrdoća prema Vickersu vrlo je osjetljiva na prisustvo tih zaostalih naprezanja. Prosječna tvrdoća svih uzorka veća je od tvrdoće monolitne Al_2O_3 keramike, što je rezultat prisustva sekundarnih tvrdih čestica silicijevog karbida.

Vickersova metoda korištena je i za mjerenje lomne žilavosti. Vidljivo je da rezultati mjerenja uglavnom prate rezultate mjerenja tvrdoće. Najviša lomna žilavost koja je dobivena ispitivanjem iznosi $7,6 \text{ Mpa } \sqrt{\text{m}}$ u uzorku koji sadrži 5 % SiC.

Savojna čvrstoća mjerena je savijanjem u tri točke. Uzorak je imao dimenzije $30 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ (duljina \times širina \times debljina). Razmak između čeljusti pri savojnom ispitivanju bio je 18 mm. Shimadzu servo-hidraulički uređaj je korišten s nazivnom brzinom od 0,5 mm/min. Najmanje na tri uzorka svakog kompozita provedeno je ispitivanje, sve pri sobnoj temperaturi.

Rezultati mjerenja savojne čvrstoće mjerene savijanjem u tri točke navedeni su u tablici 6.

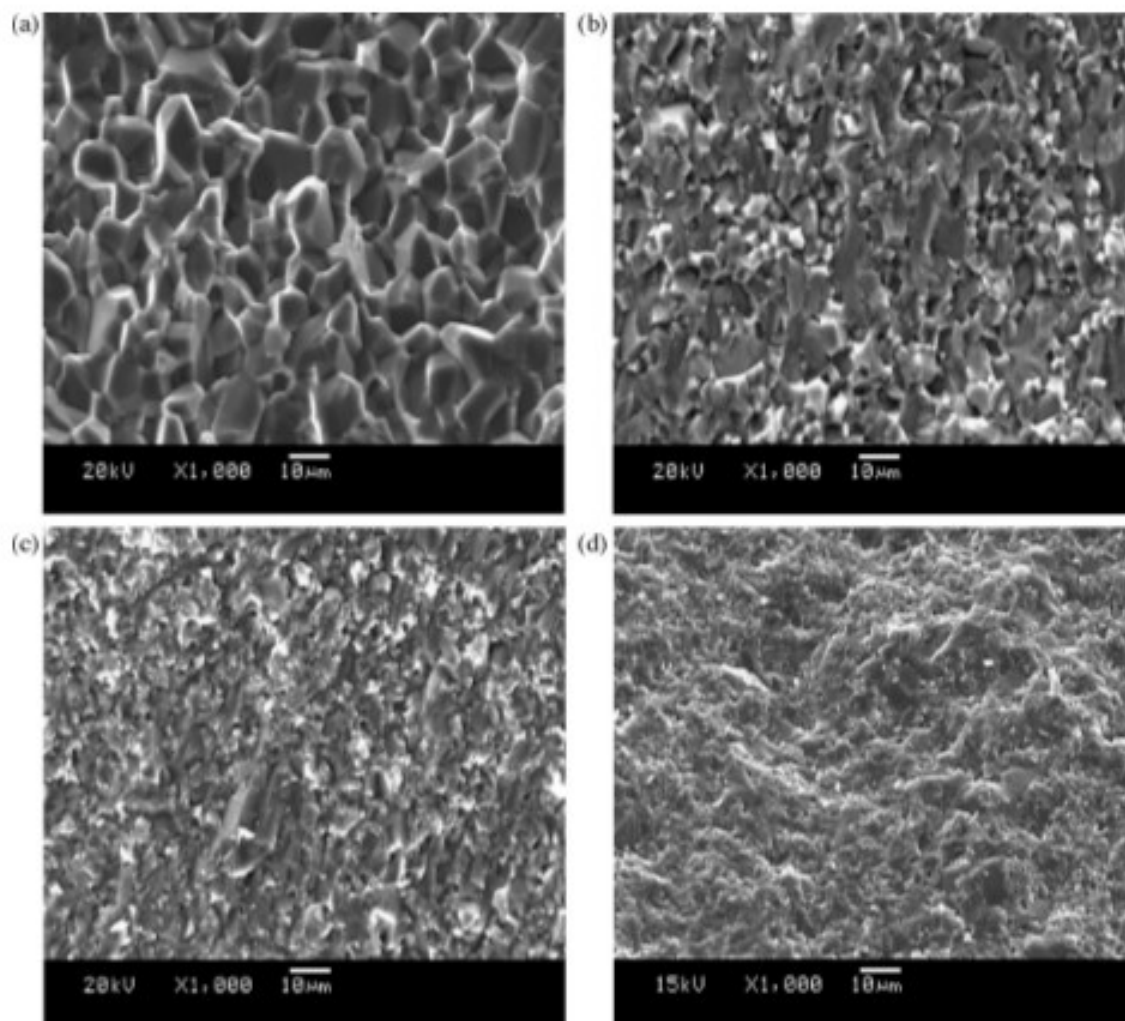
Tablica 6. Rezultati mjerenja savojne čvrstoće [18]

UZORAK	SAVOJNA ČVRSTOĆA [MPa]
A0	280,0 ± 33,0
AS1	282,2 ± 50,2
AS5	363,8 ± 67,8
AS20	459,7 ± 11,2

Savojna čvrstoća svih uzoraka viša je od savojne čvrstoće monolitne Al_2O_3 keramike, tako prema rezultatima AS5 i AS20 imaju 30 % i 64 % višu savojnu čvrstoću od nje.

Prijelomne površine uzoraka dalje su proučavane pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM). Tanki sloj zlata nanesen je na površinu uzoraka kako bi se uklonio efekt punjenja snopom elektrona.

SEM morfologija prijelomnih površina AS0, AS1, AS5 i AS20 prikazana je na slici 19. Većina zrna silicijevog karbida je lijepo raspršena u kompozitu. Veličina zrna u uzorcima AS1, AS2 i AS5 izračunata je linijskom metodom presjecanja. Prosječna izmjerena veličina zrna u uzorcima AS1, AS2 i AS5 je 6,85 μm , 3,41 μm i 1,21 μm .



Slika 19. SEM morfologija prijelomnih površina ((a) AS0, (b) AS1, (c) AS5 i (d) AS20) [18]

Kako je prikazano slikom 19. granice zrna monolitne Al_2O_3 keramike su jasne, lom je interkristalni iako u keramičkim kompozitima nailazimo na transkristalni tip loma. Granice zrna ponašaju se kao mjesta nastajanja mikropukotina i to zbog lokalnih tlačnih naprezanja po granicama zrna koja nastaju zbog termoelastične anizotropije aluminijevog oksida.

4.2. Svojstva kompozitnog Al-SiC materijala

Materijali s aluminijem u matrici (engl. AMC composites) pronalaze sve veću primjenu u zrakoplovnoj i automobilske industriji. Kod primjene za izradu kočnih pločica ovakvi materijali pokazuju jako dobra svojstva kao što su visoka toplinska vodljivost, niska gustoća, visoka čvrstoća i lomna žilavost, otpor umoru materijala kao i dimenzijska stabilnost pri visokim radnim temperaturama.

U radu R. H. Naravadei R. K. Belkara pod naslovom *Statistical Analysis of Factors Affecting the Dry Sliding Wear Behaviour of Al/SiC_p on Automobile Friction Material* iz 2014. godine ovakav kompozit dobiven je lijevanjem rastaljene Al6082 aluminijske legure pri temperaturi 750 °C i dodavanjem predgrijanih čestica silicijevog karbida. Veličina čestica iznosila je 30 do 70 µm, a njihov maseni udio u konačnom proizvodu 15 %. Tako dobiven materijal podvrgnut je ispitivanju trošenja i to metodom *Pin on disc*. Rezultati su prikazani u tablici 7 [19].

Tablica 7. Rezultati ispitivanja trošenja Al- SiC materijala[19]

Krug	Temperatura °C	Opterećenje N	Brzina okretanja m/s	Brzina trošenja g/mm ² × 10 ⁻⁷
1	100	10	1	2,0998
2	175	20	0,5	12,3048
3	100	15	1	8,9371
4	100	20	1	17,9483
5	100	15	1	18,2400
6	175	10	1,5	15,2156
7	100	15	1	6,9747
8	175	10	0,5	8,8926
9	100	15	1	17,1834
10	175	15	1	15,6508

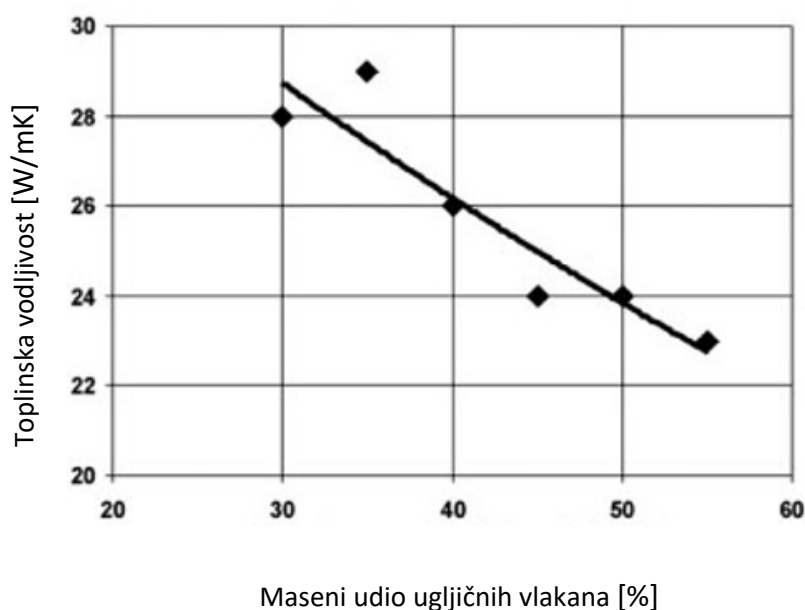
Kao što je vidljivo iz tablice 7 kompozitni materijal na bazi aluminijske legure i silicijevog karbida posjeduje dobru otpornost trošenju, no to svojstvo znatno opada povećanje temperature i opterećenja.

Kompozitni materijali s matricom od aluminija i česticama silicijevog karbida imaju gustoću od 2,8 do 3,0 g/cm³. To njihovo dobro svojstvo vodi do znatno lakših kočnih pločica i diskova od onih koji su napravljeni od sivog lijeva. No njihova primjena ograničena je na otprilike 400 °C [20].

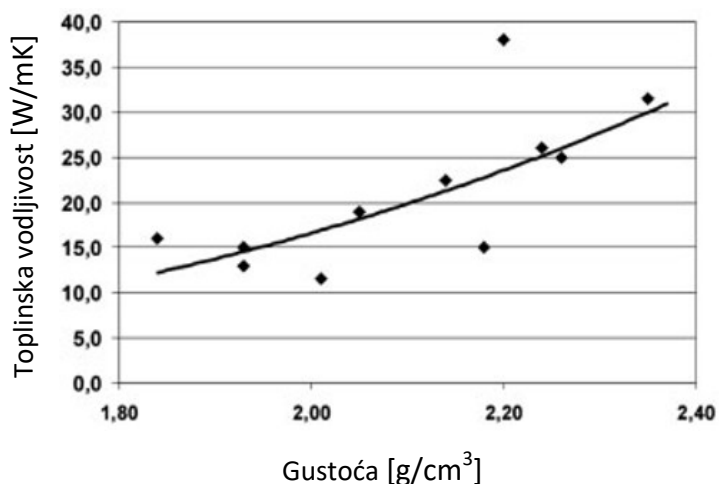
4.3. Svojstva kompozitnih materijala s ugljičnim vlaknima i dodatkom silicijevog karbida

U radu W. Krenkela, B. Heidenreicha i R. Renza pod nazivom *C/C-SiC Composites for Advanced Friction Systems* iz časopisa *Advanced Engineering Materials* iz 2002. godine, istražena su svojstva kompozitnog materijala ojačanog ugljičnim vlaknima i česticama silicijevog karbida u matrici (engl. C/C-SiC composites). Maseni udio silicijevog karbida u proizvodu iznosi otprilike 20 % što u konačnici rezultira gustoćom materijala od oko 2 g/cm^3 i vrlo niskom poroznosti. Uloga ugljičnih vlakana u kompozitu je smanjenje krhkosti silicijevog karbida, tako da je lomna žilavost ovih materijala vrlo slična sivom lijevu. Prvi pokušaji upotrebe ovakvih materijala za izradu kočnih parova izvodili su se još početkom devedesetih godina prošlog stoljeća, no nisu odmah bili prikladni za upotrebu zbog nestabilnog ponašanja prilikom trošenja na visokim temperaturama. Danas, upotrebom modernijih načina proizvodnje i prilagođavanjem materijala potrebama, riješeni su ti prvotni problemi.

Kompozitni materijali s ugljičnim vlaknima i silicijevim karbidom zadržavaju svoja dobra svojstva pri radnim temperaturama. Kočni diskovi prilikom kočenja kočnim pločicama od istog ovog materijala mogu podnijeti temperature preko 1000°C zbog vrlo visoke toplinske vodljivosti materijala. Toplinska vodljivost smanjuje se povećanjem masenog udjela ugljičnih vlakana kao što je prikazano na slici 20, dok se povećava porastom gustoće samog materijala kako je prikazano na slici 21 [20].



Slika 20. Odnos toplinske vodljivosti i masenog udjela ugljičnih vlakana[20]



Slika 21. Odnos toplinske vodljivosti i gustoće materijala[20]

Prilikom jakog kočenja i razvijanja visokih temperatura materijal se zagrijava lokalno te posjeduje odličnu otpornost temperaturnom šoku. Trošenje pri jakim silama kočenja je značajno. Primjerice, ako sila kočenja iznosi visokih 145 kJ što je slučaj kod sigurnosnih kočnica u vlakovima ili npr. prilikom slijetanja zrakoplova, stopa trošenja materijala iznosi $170 \text{ mm}^3/\text{MJ}$ [20].

U tim slučajevima otpornost trošenju može se poboljšati nanošenjem silicijevog karbida CVD postupkom na površinu C/C-SiC kompozita. Slojem silicijevog karbida debljine 0,1 do 0,2 mm smanjuje se trošenje materijala za čak 90 %, i to na iznos od približno $17 \text{ mm}^3/\text{MJ}$.

Upotreba kompozitnog materijala samo na bazi ugljičnih vlakana (engl. C/C composites) nije u upotrebi za izradu kočnih diskova i pločica zbog nepredvidivog ponašanja koeficijenta trenja u vlažnim uvjetima kao i slabe otpornosti na trošenje [20].

5. ZAKLJUČAK

Prema gore navedenim činjenicama može se zaključiti da najbolja svojstva pokazuju kočne pločice izrađene od kompozitnog materijala s ugljičnim vlaknima i dodatkom silicijevog karbida prevučenog tankim slojem silicijevog karbida CVD postupkom. Takvi proizvodi su ujedno i najskuplji te je njihova primjena ograničena samo gdje je to nužno, primjerice kod zrakoplova ili sigurnosnih kočnica, ili gdje konačna cijena proizvoda to dozvoljava, primjerice kod luksuznih i sportskih automobila.

Materijali na bazi aluminijske s dodatkom sitnih čestica silicijevog karbida također imaju dobra svojstva te nalaze široku primjenu jer su cijenom niža od gore navedenih kompozita s ugljičnim vlaknima i silicijevim karbidom.

Ograničenost primjene materijala na bazi aluminijske sa silicijevim karbidom na temperaturama nižim od 400 °C njihov je glavni nedostatak. Stoga keramičke kočne pločice na bazi aluminijskog oksida s dodatkom silicijevog karbida i dalje zadržavaju najbolji odnos cijene i kvalitete.

Iako su danas većinom u upotrebi kod osobnih automobila i dalje kočne pločice od sivog lijeva koje imaju dobra svojstva uz najnižu cijenu od navedenih, polako ih sve više zamjenjuju korozijski otporne kočne pločice na bazi tehničke keramike.

6. POPIS LITERATURE

- [1] <http://www.bridgestonetire.com/tread-and-trend/drivers-ed/ceramic-vs-metallic-brake-pads> preuzeto u siječnju, 2017.
- [2] J. Macan, Definicije pojmova vezanih uz strukturu i pripravu solova, gelova, mreža, te anorgansko-organskih hibridnih materijala, Preporuke: IUPAC 2007; HDKI i HKD 2011. <http://bib.irb.hr/datoteka/504797.135.pdf>.
- [3] S. Musikant, What every engineer should know about ceramics, Marcel Dekker, Inc., New York-Basel-Hong Kong, 1991.
- [4] T. Filetin, I. Kramer, *Tehnička keramika*, Verband der Heramischen Industrie e.V., Brevier Technische Keramik, 2005.
- [5] <https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/metal-matrix-composites/> , preuzeto u siječnju, 2017.
- [6] http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/keramika_korema92.pdf , preuzeto u siječnju, 2017.
- [7] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1429774002-0-kbd_2.dio.pdf , preuzeto u siječnju, 2017.
- [8] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1459928787-0-vjezbe_5-8_2016.pdf preuzeto u siječnju, 2017.
- [9] <http://www.basic-stuff.com/hobbies/ceramics/slip-casting.htm> , preuzeto u siječnju, 2017.
- [10] A. G. King, *Ceramic technology and processing*, Norwich, New York USA, 2002.
- [11] <http://muddculture.blogspot.hr/2011/08/slip-casting-slip-trailing-and-altered.html> , preuzeto u siječnju, 2017.
- [12] Goran Popović, *Tehnika motornih vozila*, Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik (Fachkenntnisse), 27. Auflage, 2004.
- [13] <http://paica.hr/autodijelovi/hidraulika-kocenja-i-kvacila/> , preuzeto u siječnju, 2017.
- [14] <http://azrol-everythingsinfo.blogspot.hr/2013/01/fungsi-dan-penukaran-brake-disc-dan.html> , preuzeto u siječnju, 2017.

- [15] D. Chan and G. W. Stachowiak, Review of automotive brake friction materials, *Automobile Engineering*, 218, (2004.), 953-966.
- [16] https://www.flickr.com/photos/asbestos_pix/3562218687 , preuzeto u siječnju, 2017.
- [17] <http://akebonobrakes.com/euro> , preuzeto u siječnju, 2017.
- [18] Y. L. Dong (2008.), Fabrication and mechanical properties of nano-/micro-sized $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ composites, *Materials Science and Engineering A*, 504, (2009.), 49-54.
- [19] R. H. Naravade and R. K. Belkar, Statistical Analysis of Factors Affecting the Dry Sliding Wear Behaviour of Al/SiC_p on Automobile Friction Material, *The International Journal Of Engineering And Science* , 3, (2014.), 5-13.
- [20] W. Krenkel, B. Heidenreich, R. Renz, C/C-SiC Composites for Advanced Friction Systems, *Advanced Engineering Materials*, 4, (2002.), 427-436.